This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

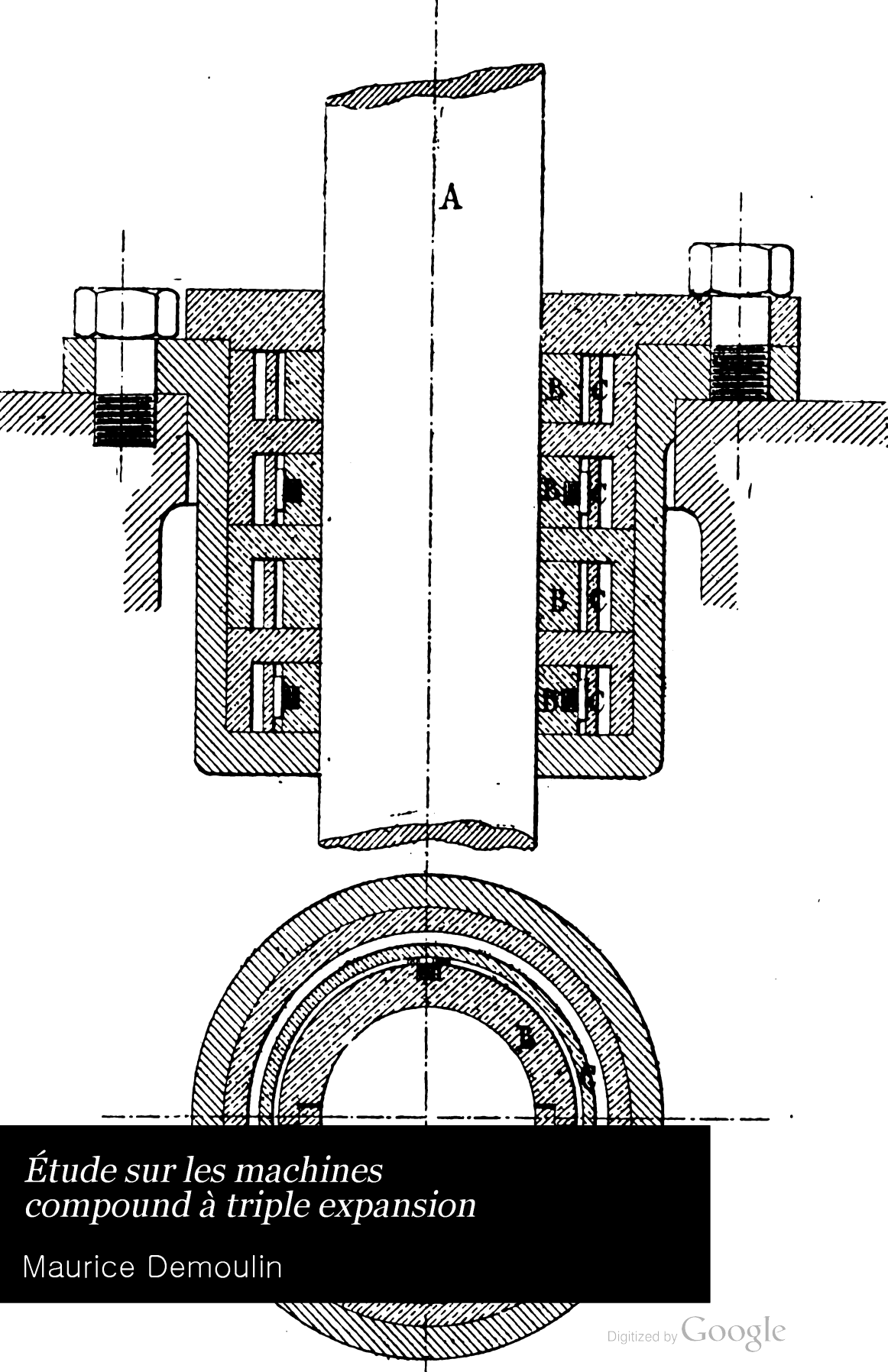
Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.
+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.
+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.
+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`



Étude sur les machines compound à triple expansion

Maurice Demoulin

Digitized by Google

University of Wisconsin
LIBRARY
Class THB
Book .D39
E

Digitized by Google

UNIVERSITY OF WISCONSIN
No. 43
ENGINEERING LIBRARY.

Digitized by Google

Digitized by Google

ÉTUDE

SUR LES

MACHINES COMPOUND A TRIPLE EXPANSION

Digitized by Google

Digitized by Google

UNIVERSITY OF WISCONSIN
No.
ENGINEERING LIBRARY

ÉTUDE

SUR LES

MACHINES COMPOUND

A TRIPLE EXPANSION

PAR

MAURICE DEMOULIN
INGÉNIEUR DES ARTS ET MANUFACTURES

PARIS
LIBRAIRIE POLYTECHNIQUE
BAUDRY ET Cie, LIBRAIRES-ÉDITEURS
15, RUE DES SAINTS-PÈRES, 15
LIÈGE, rue Lambert-Lebègue, 19

1886

Digitized by Google

Digitized by Google

18281
THB
.D39
E
69 50718

ÉTUDE

SUR LES

MACHINES COMPOUND A TRIPLE EXPANSION

PREMIÈRE PARTIE

NOTIONS PRÉLIMINAIRES

Depuis quelques années, un nouveau genre de machines compound, qui paraît destiné à se répandre rapidement, s'est introduit dans la construction navale. Nous voulons parler des *machines à triple expansion*, où la détente de la vapeur est opérée successivement, en deux cascades distinctes, dans trois cylindres au moins.

Les Anglais commencent à construire un assez grand nombre de ces appareils, et notre Compagnie transatlantique se prépare à en placer de très puissants à bord des grands paquebots qu'elle construit actuellement à Saint-Nazaire. A l'heure présente, on ne compte encore, en service, qu'une centaine de machines à triple expansion, mais il n'est pas douteux que leur nombre ne s'accroisse considérablement et dans un avenir très prochain.

Il a été fort peu écrit sur ce sujet, et les rares documents dont puisse disposer l'ingénieur sont épars dans des revues et des journaux techniques, la plupart anglais, où l'on ne peut facilement les consulter. Sans avoir la prétention de combler

Digitized by Google

une lacune, nous nous proposons de colliger les principaux faits actuellement connus sur les appareils à triple expansion, de montrer les avantages particuliers de ces machines, d'examiner les conditions générales de leur fonctionnement; enfin, de décrire les dispositifs usuels et l'arrangement relatif de leurs différents organes.

Les machines à triple expansion n'ont pas eu d'inventeur, à proprement parler. Tous les mécaniciens ou constructeurs peuvent avoir eu l'idée de ces machines : la conception première en est si simple qu'elle se présente immédiatement à l'esprit, dès que l'on étudie le moins du monde les machines Woolf ou compound ordinaires. Toutefois, il importe de reconnaître l'initiative prise dans ce sens par M. Benjamin Normand et l'influence réelle qu'ont eue ses travaux sur la création et le développement de ce genre de moteur.

Les premières machines à triple expansion paraissent avoir été celles du bateau-omnibus de la Seine, n° 30, vers 1881, et de la *Gabrielle*, steamer à hélice de 950 tonneaux, construit et lancé en 1873 par MM. Jollet et Babin, de Nantes. Ces appareils furent exécutés suivant des plans pour lesquels M. B. Normand, dont on connaît l'ingéniosité, venait de prendre un brevet. La même année, J. Elder étudia la première machine à cascades, laquelle fut mise à bord du vapeur *Propontis*.

Pendant les trois années qui suivirent, les Anglais restèrent en arrière et abandonnèrent, momentanément, les machines à triple expansion. Au contraire, MM. Jollet et Babin livrèrent, en 1876, le *J.-B. Say*, dont la machine, ainsi que nous le verrons plus tard, donna des résultats économiques remarquables pour l'époque.

En 1878 et 1879, la même maison construisait, également d'après les plans brevetés de M. B. Normand, les appareils de l'*Atlantique*, de la *Corinne* et du *Rapide*, tandis que MM. Hawks

Digitized by Google

Crawshay, et Douglas and Grant, en Angleterre, mettaient en service l'*Anthracite* et l'*Isa*.

De 1879 à 1882, aucune nouvelle machine à triple expansion ne se produit; mais, à partir de cette dernière date, les Anglais commencent à prendre la tête pour ce genre de construction en exécutant les machines des steamers *Aberdeen* (Napier and Sons), *Draco* et *Yeddo* (Earle's Shipbuilding C°), *Hidalgo* (Amos and Smith), enfin, *Claremont* et *Albertina* (Douglas and Grant). Cependant l'essor définitif ne fut donné que vers le commencement de 1883, pour se continuer plus brillamment en 1884. Pendant cette courte période, les machines à cascades gagnent du terrain. En Angleterre, MM. Napier and Sons, entre autres, construisent, dans ce système, trois appareils de 5 000 chevaux pour les paquebots de la Compagnie transatlantique mexicaine : *Mexico*, *Tamaulipas*, *Oaxaca*, et deux de 8 000 chevaux pour un cuirassé russe. En Allemagne, la maison Schichau, d'Elbing, achève les appareils du *Falkenburg*, de l'*Ottokar*, et commence 29 machines de torpilleurs. Enfin, vers le milieu de 1885, la maison J. Elder, de Glasgow, reçoit la commande de trois machines de 8 000 chevaux chacune pour les nouveaux paquebots du *North German Lloyd*.

En France, de 1879 à 1885, il ne fut pas construit de machines à triple expansion, malgré les résultats satisfaisants que les premières avaient donnés. Seule, la Compagnie transatlantique se décida à en exécuter deux à la fin de 1884. La même Compagnie se prépare à remplacer l'appareil du *Lafayette* par une machine à triple expansion qui marchera à 12 kilogrammes. On voit, avec regret, qu'il en a été pour ce genre de machines comme pour tant d'autres innovations, et que la France, après avoir donné l'exemple, s'est laissé notablement distancer (1). Toutefois, les avantages des machines

(1) Depuis que ces lignes ont été écrites, la *Société des Ateliers et Chantiers*

Digitized by Google

à triple expansion sont bien démontrés maintenant, et nul doute que nos constructeurs ne se lancent hardiment dans une voie où les Anglais semblent trouver leur avantage et qui paraît mener sûrement au progrès.

Aujourd'hui, en raison de l'avilissement du fret et de la concurrence, les armateurs ont plus que jamais intérêt à faire usage de machines économiques. Dans bien des cas, une légère diminution de la consommation journalière pourrait rendre rémunérateur un navire auparavant onéreux à son propriétaire. Cela n'est plus à démontrer.

Principes du fonctionnement. — La vapeur des chaudières est admise dans un premier cylindre où la période d'admission a lieu pendant les 0,60 ou les 0,75 de la course, environ. De là, le fluide se rend dans un cylindre à moyenne pression, dont le volume est plus grand que celui du précédent ; il s'y détend comme dans le grand cylindre d'une machine compound ordinaire. Ensuite, la vapeur est envoyée dans un troisième cylindre, de plus forte capacité, où s'opère la détente finale ; enfin, il y a échappement au condenseur.

Ce que nous venons de dire s'applique aux machines à trois cylindres, mais beaucoup d'appareils à triple expansion en ont quatre; la vapeur se détend alors simultanément dans les deux derniers cylindres qui forment la troisième cascade. Certaines de ces machines ont six cylindres : par exemple un cylindre d'admission, deux cylindres à moyenne pression et trois autres, plus volumineux, à basse pression. On peut aussi, comme dans l'*Arabian*, disposer deux petits cylindres à haute pression, un second cylindre de première détente et un troisième d'expansion finale. L'arrangement et le nombre des cylindres sont variables, mais le principe est toujours le même.

de la Loire a entrepris la construction de deux grandes machines marines à triple expansion : l'une de 12 200 chevaux, l'autre de 8 000 chevaux.

Digitized by Google

Le nombre des manivelles n'est pas forcément égal à celui des cylindres. *Les appareils à triple expansion peuvent fonctionner comme machines Woolf, comme compounds à réservoir, ou bien participer à la fois de ces deux systèmes.* Beaucoup de machines à trois cylindres ont deux vilbrequins seulement; afin de ne pas compliquer le mécanisme, et de ne pas allonger la base de la machine, les pistons à haute et moyenne pression sont montés sur une tige commune et actionnent la même bielle. Les machines de la *Champagne*, à six cylindres, n'ont que trois manivelles.

CONSIDÉRATIONS THÉORIQUES

Les éléments de la thermodynamique démontrent que le rendement calorifique d'une machine à vapeur donné par la formule du cycle de Carnot $R = \frac{T - t}{273 + T}$ est d'autant meilleur que la différence $T - t$ (soit θ) entre les températures de la vapeur, à son entrée et à sa sortie du cylindre, est plus grande. Or, il existe deux manières d'augmenter θ : diminuer t ou accroître T. Mais t atteint ordinairement le minimum dont il est susceptible, puisque c'est la température du condenseur, laquelle est sensiblement la même dans les machines bien exécutées. Il faut donc, pour améliorer le rendement, augmenter T le plus possible ou, ce qui revient au même, accroître la pression de la vapeur employée.

Dans la pratique, il intervient des causes diverses qui contrebalancent les avantages des hautes pressions et même les rendent nuisibles à partir d'un certain point. Il est avéré, et les expériences récemment faites au Creusot l'ont démontré d'une façon particulièrement sérieuse, que « contrairement aux conséquences auxquelles conduit l'étude théorique des moteurs à vapeur, la marche n'est pas d'autant plus économique que la pression de la vapeur est plus élevée, et que la

Digitized by Google

détente est plus grande. Lorsque la pression reste la même et que la détente augmente, la consommation de vapeur va d'abord en diminuant, puis elle s'accroît. Pour chaque pression, il existe un minimum de consommation, répondant à un travail et à une détente déterminée (1). »

Cela est vrai pour tous les systèmes de machines à vapeur, mais dans une proportion variable, suivant le genre de détente adopté. Les meilleures machines à cylindre unique présentent le défaut précédent à un plus haut degré que les appareils compound; tout le monde en connaît la raison. La vapeur des chaudières est admise dans le cylindre, immédiatement après que celui-ci vient d'être en communication avec le condenseur pendant une course entière. Ce cylindre est donc beaucoup plus froid que la vapeur, laquelle se condense en partie pendant l'introduction, jusqu'à ce que les parois du cylindre se soient échauffées à la température de la vapeur. Dans la réalité, à cause de la vitesse du piston, les parois du cylindre ne passent pas à chaque course par les températures extrêmes T et t; il s'établit une sorte d'équilibre, et la température de ces parois oscille autour d'une température moyenne θ_1 égale à $\frac{T-t}{2}+t$. Par conséquent, les condensations à l'admission, lesquelles forment la principale perte dans les machines de construction soignée, augmenteront avec les températures ou les pressions, en même temps que le rendement, mais plus vite cependant, puisque les moteurs à vapeur cessent de donner des résultats satisfaisants quand la pression dépasse une certaine limite. Il en résulte que l'on arrivera difficilement à construire des machines monocylindres très économiques, puisqu'elles ne peuvent convenablement utiliser la

(1) *Essais effectués sur une machine Corliss aux usines du Creusot.* M. F. Delafond, Ingénieur en chef des Mines, 1884. (Voir *Portef. Mach.*, juin et juillet 1885.

Digitized by Google

vapeur, dans le cas où celle-ci donnerait les meilleurs rendements calorifiques.

Il n'en est plus de même dans une machine compound. Pour le cylindre à haute pression, t n'est pas constant pour tous les appareils, et sa valeur est toujours plus grande que dans le cas précédent, puisqu'il représente la température de la vapeur au réservoir intermédiaire, où la tension dépend du degré d'introduction au petit cylindre, et de la pression aux chaudières. Pour une même pression initiale, l'écart des températures sera donc beaucoup moindre au cylindre à haute pression, que dans le cylindre d'une machine Corliss par exemple, et les condensations à l'admission seront diminuées.

Les mêmes phénomènes se reproduisent pour le grand cylindre, où l'on a $t' - t < T - t$; ici t' est la température au réservoir; t est celle du condenseur, nous la supposons constante.

Pour montrer combien sont variables les condensations que peut entraîner une légère différence entre les écarts de température dans un même cylindre, nous ne saurions mieux faire que de citer un autre passage du même ouvrage (1) : « Nous pouvons même ajouter qu'un faible écart dans le refroidissement pendant la détente entraîne de grands changements dans les condensations initiales. Supposons, par exemple, de la vapeur à 8 kilogrammes (température 169°) et à 4 kilogrammes (température 143°), avec détente de 9/10. Nous avons déjà dit que la courbe de détente se rapprochait, surtout vers la fin de l'expansion, de l'hyperbole équilatère; nous pouvons donc admettre, sans erreur notable, que les pressions finales seront, pour les deux cas considérés, de $0^k,8$ (température 93)° et de $0^k,4$ (température 76°). La chute de température pendant le détente sera, dans le premier cas, de 76°, et, dans le second,

(1) F. Delafond.

Digitized by Google

de 67°. La différence entre ces deux chiffres est assez faible; cependant les condensations initiales, avec une pression de 8 kilogrammes, seront environ deux fois plus grandes que celles correspondantes à une marche à 4 kilogrammes ».

On peut donc concevoir que la somme des condensations, produites dans chacun des deux cylindres d'une machine compound, par suite des écarts de température $T - t'$ et $t' - t$, soit plus faible que ne le serait la condensation résultant directement d'une chute $T - t$. Cette assertion pourra paraître

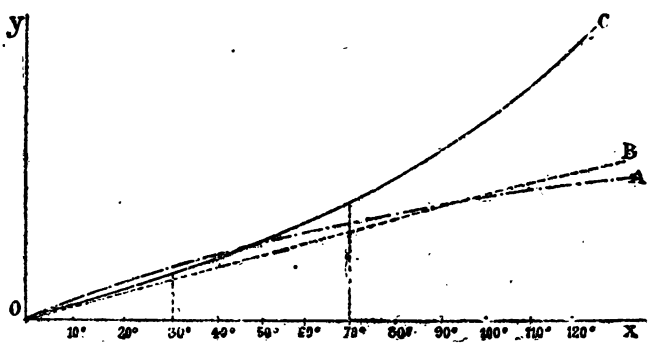


Fig. 1.

bien osée à quelques personnes, aucune expérience rigoureuse n'étant venue jusqu'ici à l'appui de ce fait. Toutefois le raisonnement suivant nous paraît devoir le corroborer. Prenons deux axes de coordonnées rectangulaires, *ox* et *oy*. Portons, comme abcisses, les écarts de température $T - t$, et comme ordonnées, les poids correspondants de vapeur condensée; puis, traçons la courbe représentant ces condensations. (Fig. 1). Cette courbe passera nécessairement par l'origine, puisque, pour une différence de température égale à zéro, le poids de vapeur condensée sera nul. La marche de la fonction pourra affecter trois formes différentes : ce sera une branche de forme parabolique A, si les condensations n'augmentent pas dans

Digitized by Google

la même proportion que les écarts de température; ou bien une droite B, si cet accroissement est constant; ou enfin, une branche hyperbolique, désignée par C, et asymptotique à l'ordonnée de l'infini, si les condensations croissent plus vite que $T - t$. Cette dernière hypothèse ne saurait être que la véritable, puisque, si l'on passe à la limite, pour $T - t = \infty$, on aurait, dans ces deux premiers cas, un poids fini d'eau condensée, ce qui est inadmissible.

Il va sans dire que nous éliminons l'élément temps; nous admettons implicitement que ce poids de vapeur condensée est tel, que la température des parois considérées devienne celle de la vapeur, soit T.

Si donc la courbe représentative des condensations à l'admission est une branche d'hyperbole, il est facile de se rendre compte que la somme des condensations résultant de deux chutes successives de température $T - t'$ et $t' - t$, est plus faible que celle indiquée par l'ordonnée correspondant à $T - t$.

Les machines à cascades possèdent une autre cause indiscutable de supériorité, signalée pour la première fois par M. A. Mallet, croyons-nous, à propos des moteurs compound ordinaires, et que nous présenterons sous la forme suivante dans son application aux appareils à triple expansion, pour lesquels elle acquiert plus d'importance : *le pouvoir condensant, c'est-à-dire la somme des produits des surfaces refroidissantes de chacun des trois cylindres d'une de ces machines par les écarts correspondants de température, est moindre que le produit de la surface refroidissante du cylindre d'une machine monocylindre, — pour la même puissance, la même pression initiale et la même détente, — par la différence des températures extrêmes qui s'y produisent.* Il va sans dire que les machines compound simples occupent une position intermédiaire entre ces deux cas.

Nous avons fait le calcul des *pouvoirs condensants totaux*

Digitized by Google

pour trois genres de machines : monocylindre, compound ordinaire, à triple expansion, la puissance développée étant sensiblement la même dans les différents cas; on en trouvera les éléments dans le tableau de la page suivante dont les résultats viennent à l'appui de la thèse précédente.

Ceci résume le principal avantage *théorique et physique* des moteurs compound; toutefois, il existe également une limite après laquelle ces appareils cessent d'être économiques. Si, par exemple, on augmente la pression de régime, la détente au petit cylindre, et le volume engendré par le grand piston, de telle sorte que les écarts de température, dans chaque cylindre, se rapprochent du T — t donné par la machine monocylindre, il se produira encore de fortes condensations initiales. Alors il deviendra nécessaire de créer une nouvelle machine, plus en rapport avec la haute pression de la vapeur : ce sera la machine à triple expansion. Les écarts des températures dans chacun des trois cylindres seront : T — t', t' — t'', t'' — t. Pour les mêmes raisons que pour celles développées plus haut, les condensations à l'admission seront inférieures à celles provenant d'un écart brusque T — t, ou de deux chutes successives seulement, comme dans les machines compound. L'utilisation de la vapeur à haute pression se faisant mieux, le moteur sera plus économique au point de vue calorifique. Si l'on accroissait encore la pression de la vapeur, il faudrait avoir recours à la machine à quadruple expansion, et ainsi de suite.

En principe, il importe de réduire autant que possible les condensations intérieures qui jouent un rôle si pernicieux dans le fonctionnement des moteurs à vapeur, surtout si l'on admet avec M. Zeuner que l'eau condensée, séjournant dans le cylindre, vient s'ajouter à l'effet des parois et absorbe, au moment de l'introduction, des calories nombreuses qu'elle ne rend pas en totalité pendant la détente, l'excédant étant emporté par cette eau au condenseur. Or, comme le fait remar-

Digitized by Google

	MACHINE monocylindre	MACHINE compound simple	MACHINE à triple expansion
Pression initiale. Contrepression.	8,90 *k* 0,28 *k* Détente totale : 10.	8,90 *k* 0,28 *k* Détente totale : 10.	8,90 *k* 0,28 *k* Détente totale : 10.
Course des pistons.	1,00 *m*	1,00 *m*	1,00 *m*
Diamètre des cyl.	Cyl. unique : 1,50 *m*	Cyl. HP : 0,75 *m* Cyl. BP : 1,50 *m*	Cyl. HP : 0,61 *m* Cyl. MP : 0,96 *m* Cyl. BP : 1,50 *m*
Surface condensante de chaque cylindre, y compris les fonds.	Cyl. unique : 8,22 m^2	Cyl. HP : 3,23 m^2 Cyl. BP : 8,22 m^2	Cyl. HP : 2,50 m^2 Cyl. MP : 4,47 m^2 Cyl. BP : 8,22 m^2
Pressions initiales et finales températures et écarts de températures correspondants dans chaque cylindre.	Cyl. un. $\left\{\begin{matrix}8{,}90\,k\,;\ T=175^\circ\\ 0{,}28\,k\,;\ t=66^\circ\end{matrix}\right\} T-t=109^\circ$	Cyl. HP $\left\{\begin{matrix}8{,}90\,k\,;\ T=175^\circ\\ 2{,}95\,k\,;\ t'=133^\circ\end{matrix}\right\} T-t'=42^\circ$ Cyl. BP $\left\{\begin{matrix}2{,}95\,k\,;\ t'=133^\circ\\ 0{,}28\,k\,;\ t=66^\circ\end{matrix}\right\} t'-t=67^\circ$	Cyl. HP $\left\{\begin{matrix}8{,}90\,k\,;\ T=175^\circ\\ 3{,}51\,k\,;\ t'=139^\circ\end{matrix}\right\} T-t'=36^\circ$ Cyl. MP $\left\{\begin{matrix}3{,}51\,k\,;\ t'=139^\circ\\ 1{,}48\,k\,;\ t''=110^\circ\end{matrix}\right\} t'-t''=28$ Cyl. BP $\left\{\begin{matrix}1{,}48\,k\,;\ t''=110^\circ\\ 0{,}28\,k\,;\ t=66^\circ\end{matrix}\right\} t''-t=45^\circ$
Pouvoir condensant dans chaque cylindre.	Cyl. unique : 8,22 $m^2 \times 109^\circ = 895{,}98$	Cyl. HP $= 3{,}23\ m^2 \times 42^\circ = 135{,}60$ Cyl. BP $= 8{,}22\ m^2 \times 67^\circ = 550{,}74$	Cyl. HP : 2,50 $m^2 \times 36 = 90{,}00$ Cyl. MP : 4,47 $m^2 \times 28 = 125{,}16$ Cyl. BP : 8,22 $m^2 \times 45 = 369{,}90$
Pouvoir condensant total.	895,98	686,34	585,06

Soit pour l'appareil à triple expansion un avantage de 15 0/0 sur la machine compound, et de 34 0/0 sur la machine monocylindre.

Digitized by Google

quer M. Delafond, « il y a une relation étroite entre les condensations à l'admission et le refroidissement pendant la détente. »

Ainsi, les condensations intérieures se trouvent diminuées dans les machines compound, et à un plus haut degré, dans les appareils à cascades nombreuses :

1° Par ce fait que les parois de chaque cylindre ne passent pas par les mêmes écarts de température; cela entraîne la série de conséquences examinées ci-dessus et diminue ce que nous avons appelé le *pouvoir condensant;*

2° Parce que la quantité d'eau condensée dans les cylindres étant plus petite en raison de cette première cause, son influence sur les condensations à l'admission sera moindre.

Dans un même cylindre, si l'on supprime la détente, on annihile presque absolument les condensations initiales, quoique ce cylindre soit en communication avec le condenseur à chaque course. Cela est exact pour des pressions assez basses, de $2^k,5$ à $3^k,5$, comme les expériences du Creusot l'ont encore démontré. On peut donner de ce fait une explication fort simple. En effet, la machine marchant à pleine introduction, la vapeur des chaudières, au fur et à mesure que le piston avancera, viendra en contact avec des surfaces qui ont été chauffées, pendant toute la course précédente, par la vapeur à la température d'admission. Ces parois, qui viennent d'être en communication avec le condenseur, pendant un temps d'autant plus faible d'ailleurs qu'elles sont plus rapprochées de l'origine de la course rétrograde, ne seront donc pas aussi froides que si elles avaient déjà commencé à rayonner de la chaleur, durant la période de détente précédente. Il est aisé de concevoir que les mêmes phénomènes devront avoir lieu pour le cylindre à haute pression d'une machine compound à double ou triple expansion, dans lequel la détente est très faible. Même si ce cylindre recevait la vapeur à une plus haute pression initiale que dans le cas précédent, les condensations

Digitized by Google

seraient bien atténuées, à condition que l'écart des températures y soit le même.

En résumé, *lorsqu'on veut faire usage de pressions élevées, il faut couper la détente en un nombre déterminé de cascades proportionnel à cette même pression.*

On se trouve, effectivement, en présence de ce dilemme : ou bien employer la vapeur à pression modérée, avec faible détente, puisque la machine à cylindre unique l'utilise mieux ainsi, or la thermodynamique montre que l'on obtient alors un mauvais rendement calorifique ; ou bien avoir recours aux hautes pressions, dont le rendement théorique est meilleur, et repousser la détente en monocylindres, comme donnant, dans ce cas, des résultats économiques moins satisfaisants qu'avec des tensions moyennes de 4 à 5 kilogrammes. Autrement dit , le progrès futur de la machine à vapeur résultera de la généralisation des pressions élevées, avec expansions successives dans plusieurs cylindres.

Les moteurs à détentes multiples doivent leur supériorité économique, en partie aux causes que nous avons signalées, en partie à un fait très important qui, jusqu'à nos jours, a échappé à la plupart des savants et des ingénieurs, et qui consiste en ce que *la vapeur condensée au petit cylindre agit, après sa réévaporation, sur les pistons des cylindres d'expansion pendant toute la course et avec une détente qui lui est propre*, puisque l'introduction est limitée à une fraction de la course. Avec la machine monocylindre, au contraire, la vapeur produite par la réévaporation pendant l'expansion, dans le cylindre, de l'eau de condensation, *ne se détend pas, mais agit simplement comme si elle était fournie, à pleine admission, par une chaudière distincte*, à la pression correspondante ; on perd ainsi une notable quantité de calories. Ce raisonnement, qui ne repose pas sur des hypothèses, permet seul d'expliquer les résultats économiques qu'ont donnés certaines machines compound, dans lesquelles les condensa-

Digitized by Google

tions intérieures, pour des raisons particulières, étaient restées considérables.

Tout ce que nous avons dit des appareils compound, s'applique à plus forte raison aux machines à triple expansion. Ajoutons pourtant que les secondes sont une expression plus complète des premières : elles en possèdent donc tous les avantages à un plus haut degré.

AVANTAGES PRATIQUES DES MACHINES A TRIPLE EXPANSION

Aux avantages théoriques que nous avons résumés plus haut, viennent s'ajouter des considérations d'un autre ordre, et non moins capitales.

On sait combien il importe, dans les appareils de navigation, de réduire autant que possible les efforts initiaux sur les pistons et les couples de torsion sur les arbres, afin d'éviter les chances de rupture, de diminuer les frottements des portées dans leurs coussinets, et de régulariser la rotation. Les machines compound offraient déjà, à ce point de vue, une grande supériorité sur les machines ordinaires. Nous allons voir que les appareils à triple expansion satisfont mieux encore à ces conditions. En effet, pour une pression de régime identique, la surface du petit piston sera plus faible et celle du grand, sensiblement la même que dans une machine compound de puissance égale. Le piston à moyenne pression, intermédiaire, actionnant une troisième manivelle qui fait un angle déterminé avec les deux premières, contribuera, pendant la plus grande partie d'une révolution, à soulager l'arbre et ses coussinets des poussées dues aux autres pistons. Les efforts initiaux seront eux-mêmes bien diminués, partagés qu'ils sont entre trois pistons plus petits. Par conséquent, les pressions maxima sur chacun de ces pistons étant moindres et ne se correspondant pas, puisque ces pistons commandent des coudes à 120° par exemple, les efforts qu'ils exercent s'équilibreront partiellement, au profit de la régularité.

Digitized by Google

Un exemple fera comprendre, mieux que des mots, l'avantage que présentent sous ce rapport les machines à triple effet.

Comparons une machine à triple expansion avec un appareil compound à trois cylindres, dont deux de détente.

1° *Machine à triple expansion.*

Pression initiale, $8^k,90$; contrepression, $0^k,281$; rapport de détente, 10.

Surface du piston à HP (haute pression). .	$\frac{S}{6}$
— — à MP (moyenne pression). .	$\frac{5\,S}{12}$
— — à BP (basse pression). .	S
Introduction au cylindre HP	0,60
— — MP	0,61
— — BP	0,60
Pression calculée au premier réservoir . .	$3^k,51$
— — au second réservoir . .	$1^k,48$
Pression moyenne effective au cylindre à HP.	$4^k,57$
— — — MP.	$1^k,71$
— — — BP.	$1^k,05$
Poussée initiale effective sur le piston à HP.	0,901 S kil.
— — — MP.	0,846 S kil.
— — — BP.	1,199 S kil.
Poussée moyenne effective sur les trois pistons	2,523 S kil.

2° *Machine compound.*

Pression initiale, $8^k,90$; contrepression, $0^k,281$.

Surface de chaque piston à BP . . . . . $\frac{S}{2}$

Surface du piston à HP . . . . . $\frac{S}{4}$

Pour faire une détente $\frac{z}{z_0} = 10$, il faudra introduire

Digitized by Google

pendant les 0,40 de la course au petit cylindre et pendant les 0,30 pour les deux grands.

Pression au réservoir.	$2^k,95$
Pression moyenne effective au cylindre à HP.	$3^k,86$
— — — BP.	$1^k,66$
Poussée initiale effective sur le piston à HP.	1,49 S kil.
— — sur chaque piston à BP.	1,33 S kil.
Poussée moyenne effective sur les trois pistons.	2,625 S kil.

On voit, d'après ces chiffres, que la *poussée initiale effective* sur le piston à HP est, pour la machine à triple effet, les 0,60 de ce qu'elle est ici, et que ces mêmes poussées initiales sur les pistons à MP et à BP sont respectivement, dans le premier cas, les 0,63 et les 0,90 de celle exercée sur chacun des pistons à BP de la machine compound ordinaire.

On remarquera en outre que le rapport de la *pression moyenne effective* à la *pression initiale effective*, dans le cylindre à HP est, pour le premier exemple, de 0,847; pour le second, de 0,648.

Dans le même ordre d'idées, nous prierons le lecteur de se reporter aux figures 4, 5, 6, 7 et 8, planche 37-38, qui représentent graphiquement les moments moteurs sur l'arbre d'hélice, calculés pour le vapeur à triple expansion *Isle of Dursey*, d'après les courbes relevées aux essais. Dans cette machine, les cylindres à haute et moyenne pression se trouvent superposés et agissent sur la même bielle.

L'examen de la figure 8 permettra de constater que les efforts de torsion sont mieux répartis et plus réguliers que pour une machine compound ordinaire. Il importe de remarquer que, par simplification, on n'a pas tenu compte, dans le calcul de ces moments (1), de l'inertie des pièces en mouve-

(1) L'unité choisie pour exprimer ces moments est la tonne agissant à l'extrémité d'un bras de levier de 1 pied anglais ($0^m,30479$).

Digitized by Google

ment dont l'effet serait de réduire l'effort au commencement de la course pour l'augmenter vers la fin.

Nous constaterons encore que les pompes à air, de circulation et d'alimentation, sont menées par un balancier directement attelé sur la tige des pistons à haute et à moyenne pression. Comme les courbes représentatives des moments ont été calculées d'après les diagrammes, il en résulte que les efforts transmis à l'arbre par la bielle correspondante, sont moindres que ceux indiqués figure 6, de la quantité absorbée par le travail des pompes, circonstance qui tend encore à égaliser les couples de rotation.

Notons à ce propos qu'il convient, dans l'intérêt même de la régularisation, de porter à trois le nombre des manivelles. Les frottements de l'arbre sur ses coussinets sont moindres, car les couples s'équilibrent mieux; les efforts initiaux sont plus faibles et les chances de rupture bien diminuées. En outre, cette disposition rend la machine plus maniable, et l'on peut facilement marcher à vitesse réduite, ce qui est avantageux pour manœuvrer dans un chenal fréquenté, ou à la sortie d'un bassin.

Aujourd'hui que les distributions Joy et Marshall permettent de placer, sans complication, les tiroirs sur le côté des cylindres, on ne doit plus repousser le dispositif à trois manivelles en prétextant la grande longueur qu'il demande, puisqu'on peut amener les trois cylindres à se toucher.

CALCUL DES PRESSIONS MOYENNES ET DES INTRODUCTIONS.

Le calcul des pressions moyennes n'est qu'une extension de la méthode suivie pour les machines compound à deux cylindres.

Appelons : p la pression initiale ; p_0 la contrepression sous le grand piston ; C le rapport du volume engendré par le piston à basse pression à celui engendré par le piston à haute

Digitized by Google

pression; C_1 le rapport similaire du grand cylindre au cylindre à moyenne pression; d la détente totale; d_1 la détente dans le cylindre à haute pression, d_2 celle au moyen cylindre, d_3 celle au cylindre à basse pression.

Soit encore :

P_m	la pression moyenne	due à une	pression initiale	p	et une détente	d
p_m	—	—	—	p	—	d_1
p'_m	—	—	—	p'	—	d_2
p''_m	—	—	—	p''	—	d_3

Alors p' sera la pression au premier réservoir et p'' celle au second, qui est situé entre les cylindres à moyenne et basse pression. Il en résulte que les *pressions moyennes effectives* sont respectivement :

pour le petit cylindre $= p_m - p'$
pour le moyen cylindre $= p'_m - p''$
pour le grand cylindre $= p''_m - p_0$

Supposons, pour plus de simplicité, qu'il n'y ait pas de chutes de pression entre les différents cylindres. Nous aurons :

$$p''_m - p_0 = \frac{P_m - p_0}{3}$$

$$p'_m - p'' = \frac{C_1}{2}(P_m - p_0)$$

$$p_m - p' = \frac{C}{3}(P_m - p_0)$$

Ceci n'est vrai que dans l'hypothèse où les chutes de pression sont nulles entre les cylindres, ce qui, dans la pratique, ne se trouve jamais complètement réalisé. On peut en déterminer approximativement l'influence, comme pour une machine compound ordinaire. Toutefois, il est plus simple et suffisamment exact d'adopter un coefficient de rendement par lequel on multipliera les valeurs trouvées pour $p_m - p'$,

Digitized by Google

UNIVERSITY OF WISCONSIN ENG.

$p'_m - p''$, $p''_m - p_0$. Ce coefficient est compris entre 0,70 et 0,90, pour les machines à triple expansion bien construites, dans lesquelles la pression initiale ne descend pas au-dessous de 8 kilogrammes.

Quant aux introductions, on peut les déterminer ainsi qu'il suit :

Pour le cylindre à haute pression on aura :

$$\frac{1}{d_1} = \frac{C}{d} \quad (1)$$

Si l'on remarque que $\frac{C}{C_1}$ est le rapport du cylindre à moyenne pression au cylindre à haute pression, nous pourrons calculer de même l'introduction au cylindre intermédiaire, de façon à conserver la pression p' au premier réservoir.

Donc

$$\frac{p'}{d_2} \times \frac{C}{C_1} = \frac{p}{d_1}$$

ou

$$\frac{1}{d_2} = \frac{C_1}{C} \times \frac{p}{p'} \times \frac{1}{d_1}$$

remplaçant $\frac{1}{d_1}$ par sa valeur tirée de (1), il vient :

$$\frac{1}{d_2} = C_1 \frac{p}{p'd} \quad (2)$$

De même l'introduction nécessaire au grand cylindre pour maintenir au second espace intermédiaire une pression p'', sera donnée par la relation

$$\frac{1}{d_3} = \frac{1}{C_1} \times \frac{p'}{p''} \times \frac{1}{d_2}$$

soit, en remplaçant $\frac{1}{d_2}$ par sa valeur

$$\frac{1}{d_3} = \frac{p}{p''d} \quad (3)$$

Digitized by Google

PRESSIONS USUELLES. NOMBRE DE CASCADES

Nous avons vu que l'emploi des détentes successives permettait une meilleure utilisation de la vapeur à haute pression et assurait un meilleur rendement calorifique. Outre les résultats économiques qui en découlent, l'emploi des tensions élevées entraîne, pour les chaudières, une diminution de volume et souvent de poids, bien que l'excédant d'épaisseur à donner aux tôles contrebalance en partie cet avantage. Les inconvénients des hautes pressions sont en réalité peu nombreux, bien que certains ingénieurs considèrent encore leur adoption comme une source de dangers et d'ennuis de toute espèce. Désormais, c'est à la pratique de trancher cette question, sur laquelle nous reviendrons du reste à propos des chaudières.

Si M. Benjamin Normand, pour des raisons particulières, a toujours eu recours, pour ses machines à triple expansion, à des pressions modérées (de $4^k,5$ à 5^k), les Anglais ont, au contraire, une tendance marquée à augmenter considérablement le timbre des chaudières marines concurremment, bien entendu, à l'usage des machines à cascades. Les appareils de ce système, construits récemment par eux, fonctionnent tous entre 120 et 180 livres par pouce carré, soit de $8^k,40$ à 13 kil. Dans certains cas particuliers, avec des générateurs multitubulaires, on est allé plus loin encore : le yacht *Anthracite*, dont nous décrivons plus loin la machine, fonctionnait à $22^k,25$.

Il est donc nécessaire, pour obtenir un bon rendement calorifique, que le nombre des cascades varie avec la pression de la vapeur employée dans des limites qu'il est difficile de tracer exactement, mais que l'on peut estimer d'une manière suffisamment correcte. Ainsi, la réflexion et la pratique paraissent attribuer aux différents systèmes de machines à vapeur les pressions maxima de régime que nous avons con-

Digitized by Google

signées ci-contre, et au delà desquelles l'utilisation diminue évidemment.

Machines monocylindres (perfectionnées). .	4 kil.	50
Machines compound simples.	6	00
— — à triple expansion . .	10	00
— — à quadruple expansion.	15	00

Ces chiffres pourront sembler arbitraires, car leur détermination ne repose sur aucun calcul précis. Ils doivent cependant s'écarter assez peu de la réalité, et ils ont souvent été indiqués par des ingénieurs très familiarisés avec le fonctionnement des machines à cascades.

Rappelons encore à ce propos que c'est méconnaître en partie les propriétés du principe compound que d'adopter, pour les machines auxquelles ce système est appliqué, de faibles introductions au petit cylindre : une admission de 0,65 devrait être le minimum.

On ne saurait raisonnablement reprocher aux machines à détentes successives de nécessiter l'emploi d'un trop grand nombre de cylindres, d'engendrer ainsi des frottements excessifs et d'entraîner une complication du mécanisme, du moins dans les limites actuelles. Ainsi, beaucoup d'appareils compound simples ont trois cylindres ou plus ; or, ce nombre est suffisant pour l'établissement d'une bonne machine à triple expansion. Il ne faut pas non plus oublier que certains paquebots, munis de machines compound tandem, ont quatre pistons, ni que la *Normandie* et le *City-of-Rome* en ont six (trois machines Woolf accouplées). L'appareil compound simple du cuirassé *Italia*, de 15 000 chevaux, comporte douze cylindres.

PROPORTIONS DES CYLINDRES

Il est difficile de formuler des règles précises relativement aux proportions des cylindres, puisque celles-ci dépendent de la pression, de la détente, du degré d'admission. Aussi nous

Digitized by Google

contenterons-nous de mentionner les rapports de volume ordinairement usités par les principaux constructeurs. Rappelons toutefois que l'on doit surtout, dans un projet, établir ces rapports de façon à égaliser le travail des différents cylindres, à réduire au minimum les chutes de pression dans les deux réservoirs et à éviter de trop grands efforts initiaux sur les pistons.

A ce propos nous ferons remarquer que l'inconvénient le plus sérieux des machines à expansions successives réside dans les chutes de pression dont nous venons de parler. Lorsque la tension au réservoir est moindre que la pression finale au cylindre qui y déverse sa vapeur, et c'est toujours le cas pratiquement, il en résulte une diminution de la pression moyenne totale *effective*, puisque la vapeur se détend entre le cylindre et le réservoir sans produire de travail. Dans une machine à triple expansion, cet effet est plus sensible que pour un appareil compound ordinaire, puisqu'il y a deux réservoirs, et par conséquent deux chutes de pression. Encore, la perte de rendement qui en provient est-elle plutôt apparente, comme on le sait. Puisque la vapeur se détend de la quantité correspondante à la chute de pression, sans fournir de travail et sans subir aucune cause extérieure de refroidissement, il faut bien que la quantité de calories qu'elle abandonne reparaisse sous une autre forme : la vapeur se surchauffe. Bien que l'on ne récupère pas ainsi tout le travail détruit par ces chutes de pression, on profite néanmoins des avantages que présente la vapeur surchauffée, surtout pendant sa détente dans le grand cylindre.

Dans les machines compound simples, on peut réduire à rien la chute de pression au réservoir en assurant l'indépendance des distributions et en diminuant l'introduction au grand cylindre. On arrive au même résultat, mais d'une manière plus complète, en ajoutant un tiroir de détente au cylindre à basse pression; toutefois, cela complique beaucoup le mécanisme.

Digitized by Google

Lorsqu'il n'est pas indispensable de marcher à l'allure normale, on peut encore atténuer considérablement cette chute de pression en ramenant à la fois les deux coulisses de façon à obtenir un rapport total de détente double de celui pour lequel est réglé la machine. Il est intéressant de noter que si le travail est également réparti entre les deux cylindres pour la marche normale, il le sera encore très sensiblement dans ce dernier cas.

M. B. Normand a résumé dans un tableau que nous donnons plus bas, et qui du reste n'a pas encore été publié, les proportions relatives des différents cylindres dans les machines à triple expansion de son système.

DIMENSIONS DES CYLINDRES DANS LES MACHINES A TRIPLE EFFET DE M. BENJAMIN NORMAND

PUISSANCES en chevaux nominaux (1)	16	24	32	50	70	90	100
Nombre de tours.....	150	130	120	110	100	90	85
	m.	m.	m.	m.	m.	m.	m.
Course.....	0.400	0.500	0.550	0.650	0.75	0.850	0.900
Vitesse du piston par seconde..	2.000	2.166	2.200	2.380	2.500	2.550	2.550
Diamètre du cylindre à HP.....	0.220	0.260	0.300	0.360	0.440	0.520	0.560
— — MP.....	0.320	0.400	0.446	0.560	0.660	0.780	0.840
— — BP.....	0.480	0.640	0.720	0.880	1.040	1.200	1.280

Ces machines fonctionnaient à des pressions variant de 4 kil. à 5 kil., ce qui explique le faible rapport des volumes du premier au troisième cylindre, surtout par comparaison avec les appareils anglais récents.

Le tableau suivant indique les proportions relatives des cylindres dans quelques-unes des dernières machines à triple expansion qui ont été construites en Angleterre.

(1) Le cheval nominal, choisi comme unité, est de 300 kilogrammètres. Ces machines ont toujours développé aux essais une puissance supérieure à celle qui était prévue.

Digitized by Google

	Nombre d'exemples choisis	Proportions relatives des cylindres		
		Premier au second	Second au troisième	Premier au troisième
Earles Shipbuilding Company	7	2,34	3,10	7,27
T. Richardson and Sons	6	2,91	2,47	7,20
R. Napier and Sons	5	2,44	2.14	5,23
Denny and C°	2	2,71	2,71	7,36
Edward Wales	2	2,40	3,08	7,40
Amos and Smith	1	2,11	3,51	7,43
Barrow Shipbuilding Company	1	2,49	2,49	6,22
Blair	1	2,71	2,67	7,29
Douglas and Grant	1	2,56	3,06	7,84
J. Elder and C°	1	3,17	2,28	7,27
Holmes and C°	1	2,78	3,66	10,19
Hawks, Crawshay and C°	1	4,00	2,06	8,20
Rankin and Blackmore	1	2,00	3.16	6.33
Wallsend Slipway Company	1	1,86	4,00	7,44
Moyennes		2,60	2,88	7,33

Quant au degré total d'expansion, il n'est pas en général aussi grand qu'on pourrait le croire. Le rapport final de détente, pour les machines à triple effet les plus nouvelles, reste au-dessous de 14; la moyenne oscille entre 8 et 12, même avec des pressions initiales de 12 kil.

ENVELOPPES DE VAPEUR

M. B. Normand, dans ses machines, ne disposait pas toujours d'enveloppes aux cylindres de détente, il les remplaçait par un réchauffeur tubulaire, placé dans la boîte à fumée, qui servait d'espace intermédiaire, et que parcourait la vapeur d'échappement du premier cylindre. Théoriquement, cette disposition est excellente, puisqu'il y a réévaporation de l'eau entraînée ou de condensation, surchauffage de la vapeur, etc., tout cela aux dépens des gaz perdus; pourtant cet arrangement a été abandonné. Les réchauffeurs existants ont même été supprimés dans beaucoup d'appareils, à cause de la compli-

Digitized by Google

cation qu'ils entraînaient, des difficultés que présentait leur entretien, et de leur peu d'efficacité, laquelle provenait de la distance relativement grande qui séparait le réchauffeur du cylindre à moyenne pression : la vapeur se refroidissait notablement pendant son retour à la machine.

L'influence de l'enveloppe étant d'autant plus sensible que l'écart des températures dans un même cylindre est plus grand, on peut en conclure que *son effet est moindre pour les machines à triple expansion que dans les appareils compound, et pour ces derniers que dans les machines monocylindres, la détente étant la même dans tous les cas.*

DIAGRAMMES

Nous avons recueilli quelques diagrammes qui ont été relevés sur différentes machines à triple expansion.

On trouvera figures 2 et 3, planche 42, les courbes de détente totalisées pour les deux côtés des pistons, dans le navire *Isle of Dursey*, telles que les constructeurs les ont établies d'après les diagrammes pris aux essais et que nous reproduisons figures 4 et 5. L'inspection des figures 2 et 3 fait voir qu'il y a une chute importante de pression entre le second et le troisième cylindre, ce qui provient d'une mauvaise régulation du grand tiroir.

Nous donnons aussi, fig. 7, les courbes relevées sur une machine à triple expansion, d'origine allemande, étudiée par M. F. Schichau, d'Elbing, et mise à bord du *Falkenburg*. Les figures 8 et 9 représentent les diagrammes totalisés provenant d'appareils semblables, construits par la même maison pour des torpilleurs. Le premier diagramme correspond à la marche à toute vapeur (introduction de 60 °/₀ au petit cylindre), le second à une allure réduite (introduction de 8 °/₀ au petit cylindre). Dans ce dernier cas, le rapport total de détente

Digitized by Google

est de $\frac{1}{58}$ avec une pression initiale de 12 kil., et le grand cylindre ne produit qu'une quantité de travail insignifiante.

On trouvera, fig. 6, les diagrammes pris sur la machine du steamer *Arabian* que nous décrivons plus loin.

RÉSULTATS ÉCONOMIQUES

Les machines à triple expansion sont suffisamment entrées dans le domaine de la pratique pour qu'on ait pu, dès maintenant, les juger à l'œuvre et déduire de leur fonctionnement des conséquences sérieuses. Il est impossible de nier les avantages pratiques qu'a présentés leur emploi. Sans tomber dans l'exagération habituelle aux Anglais, sans partager l'engouement aveugle qu'ils montrent actuellement pour ce système de machines, sans ajouter une foi entière aux chiffres évidemment trop bas de consommations qui ont été parfois donnés, on est contraint de reconnaître que la construction des machines marines est entrée dans une phase très réelle de progrès, par la route la plus directe et la plus rationnelle.

Parmi les nombreux rapports et comptes rendus faits aux diverses sociétés techniques anglaises, qui ont paru dans des revues spéciales, ou qui sont parvenus à notre connaissance sur le fonctionnement des nouveaux appareils de navigation, nous avons recueilli ceux qui paraissent surtout impartiaux et modérés, ainsi que ceux qui, provenant d'ingénieurs compétents, ne peuvent vraisemblablement être révoqués en doute. Nous les résumons dans les quelques lignes suivantes.

La machine du *J. B. Say,* dont M. B. Normand exécuta les plans en 1876, donna des résultats économiques fort satisfaisants, en tenant compte de sa faible puissance. Pendant un essai de 4 heures 15 m., le poids du charbon brûlé fut de 1 000 kilog., et le nombre moyen de chevaux indiqués de 278,90, ce qui correspond à une consommation de 0 kil. 846,

Digitized by Google

par cheval et par heure. Nous ne connaissons guère d'appareils compound simples, de cette puissance, qui se soient montrés aussi avantageux.

M. A. E. Seaton a lu dernièrement à la société des *Naval Architects* de Londres un rapport intéressant, dans lequel sont relatées les *performances* de quelques navires construits par la *Earles Shipbuilding Company*, et dont voici la substance. Le steamer *Yeddo* avait primitivement une machine compound ordinaire qui fonctionnait à une pression de 4 kil. 92, la ligne d'arbres n'étant pas assez robuste pour supporter avec ce système d'appareil une pression initiale supérieure. Toutefois, comme la chaudière avait été calculée pour une tension normale de 7 kil., on ajouta un troisième cylindre au-dessus du cylindre de détente et l'on adopta le principe de la triple expansion, la pression de régime étant portée à 7 kil. Après cette transformation, la consommation de charbon, qui était antérieurement de 17 t. par vingt-quatre heures, se trouva réduite à 13,5 t. C'est là un résultat très remarquable à coup sûr.

Des expériences comparatives, également citées par M. Seaton, furent faites sur deux cargo-boats de 1 700 tonnes: le *Draco* muni d'une machine à triple expansion, et le *Kovno* qui avait un appareil compound ordinaire. Ils accomplirent ensemble le voyage de Bombay, dans les mêmes conditions de temps, de mer et de chargement. Pendant cette traversée, le *Draco* brûla 326 tonnes de charbon et le *Kovno*, 405 tonnes, bien que la vitesse du premier ait été supérieure. C'est une économie de 19,5 °/₀ en faveur de la machine à triple expansion, avec un accroissement de vitesse de 6,5 °/₀.

En réalité, la consommation de charbon, dans les machines à triple effet, se trouve réduite, *en service*, de 15 à 18 °/₀ environ, nous ne pensons pas que l'on puisse en toute assurance augmenter ce dernier chiffre. On aurait bien, de temps à autre, constaté des économies de 30 ou 35 °/₀, mais il faut remarquer que l'on compare souvent des appareils à cascades neufs,

Digitized by Google

avec des machines compound déjà usées, où se produisent des fuites qui ont un effet si considérable sur la consommation.

Nous avons relevé les poids de charbon brûlé par heure et par cheval pour un grand nombre de ces machines, d'après les résultats des essais, et nous avons acquis la conviction que pour des puissances variant de 300 à 3 000 chevaux indiqués, cette consommation est *toujours* inférieure à 0 kil. 800; dans certains cas, elle s'est même abaissée à 0 kil. 500. Toutefois, ce dernier chiffre a été obtenu en brûlant du Nixon, et l'on n'a pas décrassé les grilles pendant la durée des expériences.

La *Jacatra* aurait fait plusieurs fois la traversée d'Amsterdam à Java avec une consommation moyenne, par cheval et par heure, inférieure à 0 kil. 720.

La machine du *Falkenburg*, construite par M. Schichau, a indiqué une puissance de 700 chevaux, avec une consommation journalière de 10 tonnes. L'*Ottokar*, du même constructeur, développant 360 chevaux, brûle 5 tonnes de charbon par vingt-quatre heures, ce qui fait 0 kil. 579 par cheval et par heure. Ces chiffres, bien que rapportés par une personne autorisée, ne laisseront pas que de surprendre.

Le steamer *Rosario*, portant 2 500 tonnes de charbon et de marchandises à la vitesse moyenne de 8,6 nœuds, soit 15 927 mètres par heure, brûle en vingt-quatre heures 10,5 tonnes de charbon. Il en résulte que, dans un tel navire, la combustion de 11 grammes de charbon suffit à développer la puissance exigée par le transport d'une tonne kilométrique, à la vitesse de 4 m. 42 par seconde.

Digitized by Google

SECONDE PARTIE

Les machines à triple expansion comportent, nous l'avons vu, trois cylindres au moins et souvent plus. Comme ces cylindres sont susceptibles d'un grand nombre d'arrangements relatifs, ainsi du reste que les organes accessoires et le tuyautage de vapeur, nous allons, dans cette seconde partie, étudier les principales dispositions que peuvent affecter ces machines.

MACHINES A TRIPLE EXPANSION A UNE SEULE BIELLE

L'appareil à triple détente le plus simple se présenterait sous la forme d'une machine Woolf (1), avec les trois cylindres dans le prolongement l'un de l'autre et agissant sur une tige commune. Cet arrangement n'a jamais été adopté : il est facile d'en reconnaître les motifs. Par l'emploi d'un tel dispositif on perdrait *en partie*, au point de vue théorique, un des principaux avantages de la machine à expansions multiples, sur lequel nous avons longuement insisté, à savoir, le faible écart qui existe dans un même cylindre entre les températures extrêmes.

Au point de vue pratique, les efforts se trouveront moins bien régularisés que dans la machine à deux ou trois manivelles, et les pressions initiales seront incomparablement plus grandes. Le montage de trois cylindres superposés offrira de grandes difficultés; le moindre dérangement dans la direction rigoureuse de leurs axes entraînera des échauffements graves et une usure considérable.

Encore, une telle machine ne coûtera-t-elle pas beaucoup moins cher, car si les organes en mouvement y sont peu

(1) Nous avons partout désigné sous le nom de machine Woolf les appareils à deux cylindres dans lesquels les pistons, étant solidaires, se meuvent dans le même sens pendant toute la course.

Digitized by Google

nombreux, ils devront être plus robustes et plus lourds. Ajoutons qu'une avarie survenant à un seul d'entre eux suffirait pour paralyser le jeu de l'ensemble.

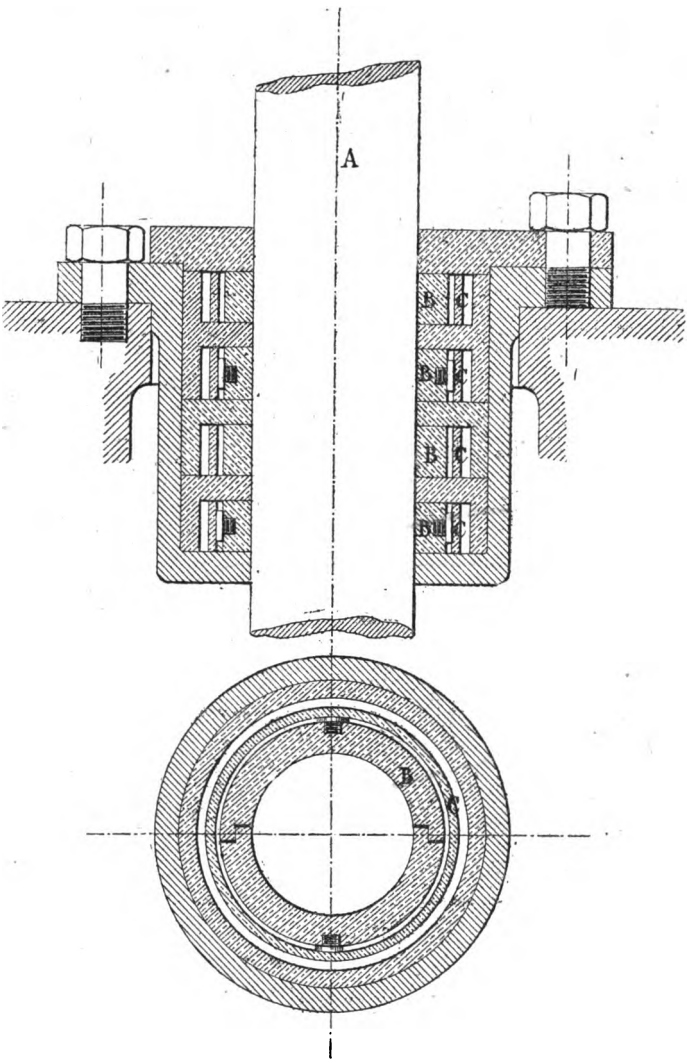
MACHINES A TROIS CYLINDRES ET A DEUX BIELLES

La machine à trois cylindres et à deux bielles est fort répandue. Les cylindres à moyenne et à basse pression, disposés côte à côte comme ceux d'un moteur compound ordinaire, agissent sur deux manivelles, faisant entre elles un angle qui peut varier de 90° à 105°. Le petit cylindre se place en *tandem* au-dessus de l'un des autres, mais on le superpose de préférence au cylindre à moyenne pression; la tige de son piston est alors formée par le prolongement de la tige du piston intermédiaire.

Les inconvénients de ce genre d'appareil sont du même ordre que ceux du type précédent, mais ils se trouvent bien atténués par l'addition d'une seconde manivelle. Les efforts sont très sensiblement mieux équilibrés que dans une machine compound simple à deux cylindres : nous l'avons mentionné plus haut, à propos de l'*Isle of Dursey*. Cet arrangement convient surtout lorsqu'il s'agit de transformer une machine compound existante en appareil à triple détente. On ajoute un petit cylindre au-dessus de l'ancien cylindre à haute pression qui devient ainsi le cylindre intermédiaire. M. B. Normand adopta cette disposition pour la machine du steamer *J.-B. Say*. Le petit cylindre ayant été directement superposé au moyen cylindre, sans intervalle, et de telle sorte que le fond correspondant était commun, la tige qui reliait les pistons n'était pas visible et l'on ne pouvait placer des presse-étoupes ordinaires à la sortie de chacun des cylindres. L'étanchéité fut assurée par une garniture métallique brevetée, très ingénieuse (fig. ci-dessous). La tige passe librement à travers une douille fixe en bronze qui porte intérieurement

Digitized by Google

quatre cannelures parallèles et circulaires. Dans chaque can-



GARNITURE MÉTALLIQUE DE M. B. NORMAND

A. Tige commune aux pistons à haute et moyenne pression,
B. Segments en bronze.
C. Ressorts en bronze.

nelure se trouve un anneau en bronze, alésé et fendu, lequel

Digitized by Google

vient embrasser la tige et la serre au moyen d'un petit ressort également annulaire et concentrique, dont la pression s'exerce sur deux têtes de vis diamétralement opposées et fixées au secteur en bronze. Les fentes des quatre cercles sont décroisées.

Signalons à ce propos un autre modèle de garniture, peu répandu encore, mais très efficace et d'une simplicité remarquable. Il se compose d'une douille, analogue à celle de M. B. Normand, mais qui porte une cannelure unique et héliçoïdale faisant plusieurs tours. A son intérieur, se trouve un ressort spiral, en bronze, alésé intérieurement, qui forme un joint étanche avec la tige des pistons autour de laquelle il s'enroule.

Nous choisirons comme exemple de machines à trois cylindres et à deux manivelles, l'appareil du *J.-B.-Say*, construit en 1878 par MM. Jollet et Babin et celui de *l'Isle of Dursey* exécuté en 1883 par la Wallsend Slipway Company; nous les décrirons très sommairement.

La machine du *J.-B. Say* est du type pilon, le petit et le moyen cylindre étant disposés en tandem. Les tiroirs de ces deux cylindres sont menés par une même tige et une même coulisse. L'angle des deux manivelles est de 105°. On ne peut modifier séparément les introductions dans aucun des trois cylindres.

La vapeur, à sa sortie du petit tiroir, est dirigée par un tuyautage spécial dans un réchauffeur tubulaire, placé dans la boîte à fumée et chauffé par les gaz perdus. Ensuite, la vapeur se rend dans la boîte à tiroir du cylindre à moyenne pression.

Voici quelques chiffres principaux concernant cette machine :

Diamètre du cylindre à HP.	$0^m,400$
— — MP.	$0^m,560$
— — BP.	$0^m,880$
Course commune	$0^m,650$

Digitized by Google

Rapport des volumes.	7
Introduction aux trois cylindres	70 °/₀
Nombre de tours moyen.	104
Puissance indiquée (chevaux de 75 kgm.) . .	278
Consommation par cheval et par heure. .	0^k876
Timbre	5 kil.
Surface de chauffe (y compris le réchauffeur d'alimentation)	94^{m^2},75

La machine du steamer *Isle of Dursey* présente une disposition semblable; toutefois, le petit cylindre qui est placé en tandem au-dessus du cylindre intermédiaire, en est séparé par une hauteur suffisante pour qu'on ait pu disposer des presse-étoupes ordinaires sur les fonds opposés de ces deux cylindres.

La pression de régime est de 10^k,54, comme dans la plupart des machines anglaises à triple expansion. Les deux premiers cylindres sont seuls munis d'enveloppes de vapeur ; le grand cylindre n'en possède pas.

Le changement de marche est opéré à l'aide d'une vis et d'un volant : les bras de rappel se terminent par une glissière oblique où peut coulisser l'extrémité de la barre de relevage des secteurs, lorsqu'on agit sur une vis munie d'un petit volant à main dont l'axe se confond avec celui du bras. On peut ainsi modifier relativement les introductions aux deux groupes de cylindres. C'est là un dispositif que l'on ne saurait trop recommander et qui devrait se retrouver sur toutes les machines marines compound.

Il est inutile de décrire plus amplement les détails de cet appareil; ils n'offrent, du reste, aucune particularité et ne sont pas dépendants du principe de la triple expansion. Rappelons seulement les dimensions générales :

Diamètre du cylindre à	HP. . .	0^m,399
— —	MP. . .	0^m,558
— —	BP. . .	1^m,117

Digitized by Google

Course commune	$0^m,838$
Nombre de tours moyen	74
Diamètre de la pompe à air . . .	$0^m,413$
Course —	$0^m,432$
Surface condensante	$73^{m^2},57$
Timbre.	$10^k,54$
Surface de chauffe	$153^{m^2},2850$
— de grille.	$3^{m^2},9020$
Rapport de la surface de grille à la surface de chauffe	$\frac{1}{39,3}$
Puissance indiquée.	617 chevaux
Surface de grille par cheval indiqué.	$0^{m^2},0063$
— de chauffe — .	$0^{m^2},2484$
Consommation de charbon par heure et par cheval	$0^k,679$ (aux essais)

MACHINES A QUATRE CYLINDRES ET A DEUX BIELLES

Ces machines sont généralement constituées par deux groupes de tandems se composant, l'un du cylindre d'admission et d'un cylindre à basse pression, l'autre du cylindre intermédiaire et d'un second cylindre à basse pression. Ce genre d'appareils fonctionne donc à la fois comme machine Woolf et comme compound à réservoir.

M. B. Normand a construit plusieurs machines de ce système. Nous donnons (fig. 2, pl. 37-38) un croquis schématique de l'appareil à aubes du *Rapide*, bateau de rivière à grande vitesse. Cette machine, très légère, est horizontale et commande l'arbre des roues par l'intermédiaire d'un pignon et d'une roue à alluchons. Le diagramme représente suffisamment les dispositions de l'ensemble et du tuyautage de vapeur pour que nous puissions nous dispenser d'une description. Les dimensions principales sont les suivantes :

Digitized by Google

Diamètre du cylindre à HP	$0^m,48$
— — MP	$0^m,72$
— des cylindres à BP	$0^m,80$
Course commune	$0^m,80$
Introductions normales aux quatre cylindres.	70 %
Timbre	5 kil.
Surface du réchauffeur tubulaire placé dans la boîte à fumée.	$2^{m^2},76$

Pour obtenir la plus grande légèreté possible, on n'a pas chemisé les grands cylindres.

MACHINES A TROIS CYLINDRES ET TROIS BIELLES

Nous avons insisté à diverses reprises sur l'intérêt que présente la machine à trois manivelles, au point de vue de la régularité et de l'équilibre des moments moteurs. Les appareils construits dans ce système conviennent tout particulièrement aux paquebots et aux grands steam-yachts par exemple, en raison des faibles trépidations qu'elles engendrent en tournant. Ils offrent d'ailleurs les plus grands avantages de sécurité en ce qui concerne la ligne d'arbres, et les paliers de la machine sont moins exposés à chauffer et à gripper.

Les Anglais ont construit beaucoup de machines à triple expansion à trois manivelles. Citons entre autres celles de l'*Aberdeen*, des trois paquebots de 5 000 chevaux pour la Compagnie transatlantique mexicaine dont nous avons déjà parlé, et de l'*Australasian*. Cette dernière, étant toute récente et présentant plusieurs particularités nouvelles, nous servira d'exemple pour cette classe de machines.

Dans l'*Australasian*, les cylindres sont placés côte à côte, dans l'axe longitudinal du bâtiment et leurs pistons actionnent trois manivelles à 120°. Cette disposition, souvent appliquée aux machines compound à trois cylindres, offre ordinairement un inconvénient sérieux qui consiste dans la longueur exces-

Digitized by Google

sive que présente alors la base de la machine. On peut y remédier partiellement en plaçant les tiroirs sur le côté et en les commandant par l'intermédiaire de balanciers ou de mouvements de sonnette. Toutefois, il faut encore ménager, entre les paliers de l'arbre à manivelles, l'espace nécessaire pour loger les excentriques, à moins que l'on ne place ceux-ci sur les plateaux de jonction. Mais alors il faut d'énormes excentriques, et le mécanisme de la distribution, ainsi que les paliers, ne sont pas suffisamment accessibles. La distribution Joy, très employée aujourd'hui en Angleterre pour les locomotives et les machines marines, et qui prend son mouvement sur la bielle, sans nécessiter l'emploi d'un seul excentrique, résout très convenablement le problème. Son adoption permet de réduire la longueur de la machine à ce qui est strictement nécessité par les portées et par l'épaisseur des bras des vilbrequins.

L'appareil de l'*Australasian* a été muni d'une nouvelle distribution, analogue à celle de M. Joy en ce sens que le va-et-vient du tiroir est produit par la combinaison de deux mouvements, l'un donné par le piston, l'autre perpendiculaire à celui-ci et pris en un point convenablement choisi sur la bielle motrice. Les excentriques sont supprimés. Ce n'est pas ici le lieu de décrire en détail cette distribution, assez compliquée en apparence, mais qui fonctionne bien.

Les petits et moyen tiroirs sont cylindriques et n'exigent de la distribution qu'un effort relativement faible. Toutefois, ils ne présentent pas une étanchéité parfaite, inconvénient secondaire pour les tiroirs des cylindres à haute et moyenne pression : le peu de vapeur qui vient à fuir n'est pas perdu, mais se retrouve dans la boîte à tiroir du grand cylindre. Le tiroir à basse pression est plan, parce qu'il importe avant tout d'éviter les fuites de vapeur au condenseur. Cet arrangement des trois tiroirs n'est pas, du reste, spécial à la machine de l'*Australasian*.

Digitized by Google

Les dimensions principales de cette machine sont les suivantes :

Diamètre du cylindre à HP. . . .	$0^m,813$
— MP. . . .	$1^m,168$
— BP. . . .	$1^m,778$
Course commune.	$1^m,371$
Timbre	$8^k,75$
Surface de grille	$16^{m^2},536$
Puissance indiquée	2630 chevaux
Surface de grille par cheval indiqué.	$0^{m^2},00628$

Pendant un essai de six heures, à puissance réduite, la consommation de charbon n'a pas dépassé $0^k,578$ par cheval. En service, cette même consommation ne s'est pas élevée en moyenne au-dessus de $0^k,726$ de bon charbon de Cardiff.

MACHINES A TROIS MANIVELLES, AYANT PLUS DE TROIS CYLINDRES

Nous prendrons comme exemple de cette classe de machines les appareils à six cylindres que construit la Compagnie transatlantique pour ses nouveaux paquebots.

Les machines se composent de trois groupes de cylindres disposés deux à deux en tandem, et juxtaposés dans l'axe longitudinal du navire. Les trois cylindres inférieurs constituent les cylindres de détente finale; le cylindre d'admission est superposé au grand cylindre du milieu, et les deux moyens cylindres se trouvent au-dessus des deux grands cylindres extrêmes. Chaque tandem constitue pour ainsi dire une machine spéciale ayant son bâti propre, son condenseur, sa pompe à air, sa turbine de circulation.

Les tiroirs sont placés sur l'avant des cylindres; les tiges des tiroirs supérieurs sont formées par le prolongement de celles des grands tiroirs. Il n'y a donc que trois coulisses pour lesquelles le relevage est commun.

Digitized by Google

Les deux cylindres à moyenne pression et le cylindre d'admission ont chacun $1^m,25$ de diamètre. Les trois grands cylindres ont chacun $1^m,90$ de diamètre. La course commune est de $1^m,70$.

A l'allure de 55 tours, avec une pression aux chaudières de 8 kil., ces machines devront développer 8 000 chevaux. Les introductions maxima sont de 70 0/0 pour le petit et le grand cylindre de la machine milieu, et de 75 0/0 pour les cylindres extrêmes. Il n'y a pas de tiroirs de détente variable.

La vapeur est fournie par un ensemble d'appareils évaporatoires qui se compose de quatre grandes chaudières tubulaires à retour de flamme, à six foyers, et de quatre chaudières plus petites, à trois foyers. La surface de grille totale est de $34^{m^2},20$.

Ces machines seront, avec les deux appareils de 8000 chevaux chacun que la maison Napier and Sons construit actuellement pour un cuirassé russe, les plus puissantes auxquelles on ait encore appliqué le principe de la triple expansion.

MACHINES MIXTES

Nous désignerons sous le nom de *machines mixtes* les appareils de navigation susceptibles de fonctionner soit comme machines compound simples, soit comme machines à triple expansion. Elles sont encore peu répandues, et conviennent tout particulièrement aux navires de guerre pour lesquels on exige deux vitesses différentes: l'une des allures étant produite avec tirage naturel sans pousser les feux, l'autre avec tirage forcé et à outrance.

Imaginons, par exemple, que l'arbre de l'hélice soit commandé par un groupe de trois cylindres, de diamètres différents, actionnant chacun une manivelle. L'ensemble de l'appareil sera disposé pour fonctionner avec triple détente. Toutefois, on disposera un tuyau spécial, donnant échappement

Digitized by Google

du moyen cylindre au condenseur, et que l'on pourra fermer avec une valve A; le tuyau de communication du cylindre intermédiaire avec la boîte du grand tiroir portera également une valve B. Lorsque l'on voudra marcher à l'allure ordinaire, on ouvrira la valve A et on fermera B; on réglera ensuite la distribution pour une faible introduction au petit cylindre : 0,45 par exemple. L'appareil se comportera alors comme machine compound simple. Pour obtenir l'allure forcée, on augmentera l'introduction au petit cylindre, on ouvrira la valve B, on fermera A, et le moteur fonctionnera comme machine à triple expansion, en développant une puissance supérieure, sans que le degré de détente et la consommation de combustible soient sensiblement modifiés, ce qui n'a pas lieu avec les machines compound ordinaires dont le fonctionnement cesse d'être économique pour la marche à outrance (1).

Un petit vapeur anglais à deux hélices, l'*Arabian*, nous fournira un spécimen intéressant de machine mixte, conçu dans un esprit un peu différent (2). Chacun des arbres ne porte qu'un coude, actionné par les pistons de deux cylindres superposés. (Fig. 1, pl. 37-38.) Au-dessus de l'arbre de tribord se trouvent un cylindre d'admission de $0^m,228$ de diamètre et un cylindre intermédiaire de $0^m,457$; au-dessus de l'arbre de babord sont placés un autre cylindre d'admission de même diamètre que le premier, et un cylindre à basse pression ayant un diamètre de $0^m,813$. La course commune est de $0^m,559$. Le cylindre à moyenne pression est entouré d'un réservoir divisé en deux parties; la plus basse est en communication, d'une part avec les tuyaux d'échappement des deux cylindres à haute pression, et de l'autre, avec la boîte à tiroir du moyen cylindre; la plus haute communique avec l'échappement de

(1) Nous ne parlons, bien entendu, que du fonctionnement de la machine proprement dite, car le rendement d'une chaudière est toujours mauvais, quelque soit le système d'appareil employé, lorsque l'on force sa production.

(2) Cette machine a été décrite en détail dans l'*Engineering* du 25 juillet 1884.

Digitized by Google

ce dernier cylindre et la boîte à tiroir du cylindre à basse pression, par un tuyau muni d'une soupape à ressort débouchant dans une conduite qui aboutit à l'extérieur. Il y a aussi un autre clapet à ressort plus petit, placé dans une chambre communiquant avec les parties haute et basse du réservoir qui entoure le cylindre intermédiaire; cette valve est disposée de façon à permettre à la vapeur de passer de la portion inférieure du réservoir dans la chambre supérieure, dès que la pression dans la première dépasse un certain degré déterminé.

Dans le fonctionnement normal, les deux machines tournant, la vapeur d'échappement des cylindres d'admission se rend à la partie basse du réservoir intermédiaire, et de là à la boîte à tiroir du moyen cylindre. Cette vapeur, après avoir agi, passe dans la partie supérieure du même réservoir, d'où un tuyau horizontal la conduit au tiroir du cylindre à basse pression. Ensuite, il y a échappement au condenseur.

Supposons que l'on stoppe la machine de babord, en mettant la coulisse au point mort, les deux valves d'arrêt restant ouvertes. L'appareil de tribord continuera à fonctionner; la vapeur d'échappement de son petit cylindre se rendra dans la partie basse du réservoir entourant le cylindre intermédiaire, elle passera de là dans la boîte à tiroir de ce même cylindre, d'où elle s'échappera après avoir agi, dans la chambre supérieure du réservoir. Puisque la machine de babord est arrêtée, cette vapeur ne peut se rendre dans le cylindre à basse pression, aussi s'accumule-t-elle dans l'espace intermédiaire, jusqu'à ce que sa pression soit suffisante pour soulever la grande valve à ressort et de là s'échapper dans l'atmosphère.

D'autre part, si la machine tribord seule est stoppée, la vapeur du cylindre à haute pression s'échappera dans la partie basse du réservoir intermédiaire, et ne trouvant pas d'issue pour se rendre dans le moyen cylindre, dont la coulisse est au point mort, elle s'accumulera jusqu'à ce que sa pression devienne assez élevée pour soulager le petit clapet à ressort,

Digitized by Google

puis elle passera dans la partie haute de ce même réservoir, de là dans la boîte du grand tiroir; elle se détendra dans le cylindre à basse pression, et finalement sera dirigée vers le condenseur à la manière ordinaire.

Ainsi, cette machine peut se comporter de trois façons différentes : comme appareil à triple expansion et à condensation, lorsque les deux machines tournent en même temps; comme compound sans condensation, quand la machine de tribord est seule en action; comme compound à condensation quand l'appareil de babord est mis en mouvement et que celui de tribord est stoppé. Malgré la complication apparente du jeu de la vapeur dans cet appareil, le fonctionnement étant parfaitement automatique, se trouve en pratique d'une grande simplicité, et n'exige de la part du mécanicien aucune manœuvre spéciale.

Ces machines fonctionnent à une pression de $10^{k},54$. La chaudière, entièrement en acier, est du type ordinaire à retour de flamme; elle a $3^{m},197$ de diamètre et $2^{m},890$ de longueur. Les foyers ont $0^{m},915$ de diamètre; ils sont en tôle ondulée de $12^{mm},5$. L'enveloppe a 25 mm. d'épaisseur.

Le système des tirants, entretoises et consolidations diverses est très robuste et très complet : sur 122 tubes, 46 forment tirants; les entretoises des boîtes à feu, boulonnées des deux bouts, sont en acier, ainsi du reste que les tirants.

Les proportions principales de ce générateur sont comme suit :

Surface de grille totale	$3^{m^2},065$
— de chauffe totale	$85^{m^2},470$
Rapport de la surface de grille à la surface de chauffe totale. . . .	$\frac{1}{27,8}$
Surface de grille par cheval indiqué.	$0^{m^2},0091$

Digitized by Google

Les machines de l'*Arabian* ont développé aux essais une puissance de 336 chevaux.

MACHINES PERKINS

Bien que la machine du yacht *Anthracite* appartienne en réalité au type à trois cylindres et à deux manivelles, nous en avons fait l'objet d'une mention spéciale en raison de son agencement particulier et de la très haute pression à laquelle elle fonctionne. Cet appareil fut construit, en 1880, par MM. Hawks, Crawshay and C°, d'après les idées de M. Perkins.

Les diamètres des différents cylindres sont comme suit : petit cylindre : $0^m,196$, moyen cylindre : $0^m,401$, grand cylindre : $0^m,579$. La course commune est de $0^m,381$. Les cylindres à haute et moyenne pression sont à simple effet; ils sont d'ailleurs superposés (Fig. 3, pl. 37-38).

La vapeur est d'abord admise sur le dessus du petit piston, puis sous le moyen; elle passe de là dans le cylindre à basse pression et enfin au condenseur. La distribution est assurée, pour les deux premiers cylindres de la série, par des soupapes de Cornouailles équilibrées. Le grand tiroir est plan et porte un tiroir de détente mené par le prolongement de la tige du piston de la pompe de circulation. Il y a deux coulisses, commandant, l'une les soupapes, l'autre le tiroir du cylindre à basse pression.

La soupape d'admission du cylindre à haute pression est menée par un excentrique unique lorsque l'on marche en avant. Quand la machine tourne en arrière, cette même soupape est soulevée par une came, et de telle sorte que la vapeur soit admise pendant toute la course : le fluide agit constamment, à la pression des chaudières, sur le dessous du piston intermédiaire, le petit cylindre n'est plus, pendant cette période, qu'un élargissement du tuyau de vapeur. Les sou-

Digitized by Google

papes d'échappement de ces deux cylindres sont commandées par une des deux coulisses que nous avons mentionnées.

Pendant les essais qui furent conduits avec le plus grand soin, la pression aux chaudières fut, en moyenne, de $22^k,20$; la pression initiale au petit cylindre n'était que de $14^k,16$, bien que la valve restât ouverte en grand. L'admission au cylindre à haute pression était de 0,52, et la détente totale correspondante de 25,71 volumes. Le nombre de tours moyen était de 103. Dans ces conditions, la consommation de charbon fut de $0^k,779$ par cheval et par heure; le poids de vapeur correspondant était de $8^k,91$. La puissance moyenne indiquée, sur les trois pistons, était respectivement : HP, 20,43 chevaux ; MP, 7,83 chevaux ; BP, 39,44 chevaux, soit en tout 67,70 chevaux.

Cette consommation de $0^k,779$ par cheval est évidemment très réduite pour une machine de cette puissance, surtout si l'on remarque que la chaudière est d'un système multitubulaire, avec l'eau dans les tubes, et l'on sait que ces générateurs sont ordinairement peu économiques. Toutefois, on se demande si les avantages calorifiques de cette machine ne sont pas très largement compensés par la complication de l'appareil et par les sujétions de toutes sortes qu'entraîne l'emploi de la vapeur à des pressions aussi formidables (1).

MACHINES A QUADRUPLE EXPANSION

A notre connaissance, il n'existe jusqu'ici que trois machines à quadruple expansion. L'une a été construite par la *Barrow Shipbuilding and Engineering C°* et placée à bord d'un petit vapeur actuellement à la Nouvelle-Orléans. Une autre a été exécutée par MM. Denny and C°, pour un porteur qui leur appartient. La troisième, également construite en Angleterre,

(1) Un nouveau bâtiment, muni d'une machine Perkins qui fonctionne à une pression de 35 kil., a été lancé en Angleterre au commencement de 1885.

Digitized by Google

actionne un navire qui fait un service sur les côtes d'Amérique.

Il n'est pas douteux que si, pour une raison quelconque, l'emploi de pressions très considérables venait à se répandre, le nombre de ces appareils ne s'accrût très rapidement.

CONCLUSIONS

Après tout ce que nous avons dit, il serait superflu de discuter la supériorité des machines à triple expansion, d'émettre des doutes sur l'opportunité de leur adoption, aussi bien que de faire leur apologie. Les avantages théoriques ne sont guère discutables et les résultats pratiques le sont moins encore. C'est pourquoi les seules questions qui s'imposent réellement sont celles que nous avons soulevées en différents endroits de ce travail, et en particulier à propos de la machine Perkins :

1° Les résultats économiques que donnent les machines à expansions successives proviennent-ils uniquement du genre particulier de détente, et subsistent-ils pour des tensions moyennes? ou bien, résultent-ils de l'usage des hautes pressions, concurremment à un mode de fonctionnement qui permet une meilleure utilisation de la vapeur saturée à haute température?

2° L'emploi des pressions élevées, soit de 10 à 13 atmosphères avec des chaudières tubulaires ordinaires, est-il d'une application suffisamment pratique pour que l'on puisse y avoir recours lorsque l'on veut créer des moteurs économiques?

Il ne nous semble pas que l'on puisse hésiter en présence de la première question. Nous nous sommes attaché, au cours de cette étude, à démontrer :

1° Que les avantages calorifiques des machines à triple expansion dérivaient autant des hautes pressions auxquelles

Digitized by Google

elles fonctionnent que du genre de détente qu'elles produisent;

2° Que ces deux éléments étaient intimement liés;

3° Que réduire la tension de la vapeur employée amenait la suppression des cascades nombreuses qui n'avaient plus raison de subsister;

4° Enfin, que la machine compound simple, laquelle n'est que la première expression des appareils à expansions multiples, convenait parfaitement pour les pressions ordinaires de 5 à 6 atmosphères.

Théoriquement, le moteur le plus économique fonctionnera à la température la plus élevée, avec un nombre correspondant de cascades. En pratique, il convient de choisir un moyen terme qui concilie la dépense de vapeur *minima* avec les facilités convenables de construction, de conduite et d'entretien. Aussi avons-nous cru devoir remarquer que, dans l'état actuel de l'art mécanique, M. Perkins était allé trop loin en adoptant pour ses machines une pression de 25 atmosphères. Cela nous amène naturellement à discuter la seconde question, aussi délicate, mais sur laquelle on peut être également affirmatif.

Les Anglais ont mis en service, dans les trois dernières années, un grand nombre de chaudières marines, du type ordinaire à retour de flamme, qui fonctionnent régulièrement à des pressions de 10 et 11 kilogrammes. Les progrès réalisés dans la fabrication des tôles d'acier de grande épaisseur, ainsi que l'adoption presque générale des foyers en tôle ondulée de Fox et l'usage absolu des riveuses hydrauliques, ont beaucoup facilité la tâche des constructeurs. Nos voisins ont dû se résigner à apporter plus de soins dans la confection des chaudières de bateau, qu'ils chaudronnaient assez grossièrement. Le nombre des entretoises et des tirants a été augmenté, le rivetage est plus consciencieusement exécuté.

Quoi qu'il en soit, et bien que la plupart des générateurs de ce genre soient de construction toute récente, on est autorisé

Digitized by Google

à dire que leur emploi, à part quelques exceptions qui provenaient d'une mise en œuvre défectueuse, n'a donné lieu à aucun inconvénient particulier ni à aucun accident sérieux. L'application des réchauffeurs de vapeur intermédiaires est bien autrement abondante en mécomptes de tous genres.

Les générateurs multitubulaires qui permettent sans danger l'emploi des très hautes pressions, ne sont pas jusqu'ici suffisamment économiques pour que leur application se répande d'une façon générale dans la marine du commerce. Dans ces chaudières, le parcours direct et souvent trop court des gaz est une cause de perte et les produits de la combustion entraînent au dehors un grand nombre de calories. En outre, certains de ces générateurs sont d'une conduite délicate et demandent un personnel nombreux, très au courant de leur fonctionnement. Il peut se faire que ces inconvénients disparaissent dans un avenir peu éloigné, et alors la cause des machines à cascades sera définitivement gagnée. Les perfectionnements apportés depuis quelques années aux chaudières Belleville permettent de supposer que ce système pourra devenir un jour ou l'autre d'une application réellement pratique à la mer.

En résumé, ce n'est pas formuler une opinion trop hardie que de considérer les appareils à triple ou à quadruple expansion comme les véritables machines de l'avenir, tant que la vapeur sera employée comme force motrice. En navigation, leur généralisation, jointe à l'emploi de pressions élevées, constituera certainement un progrès comparable à celui qui depuis vingt ans a été réalisé par l'application universelle du principe compound.

Digitized by Google

TABLE DES MATIÈRES

PREMIÈRE PARTIE

Notions préliminaires. Principes du fonctionnement 5
Considérations théoriques 9
Avantages pratiques des machines à triple expansion 18
Calcul des pressions moyennes et des introductions. 21
Pressions usuelles. Nombre de cascades 24
Proportions des cylindres 25
Dimensions des cylindres dans les machines à triple effet de M. Benjamin Normand. 27
Enveloppes de vapeur 28
Diagrammes 29
Résultats économiques 30

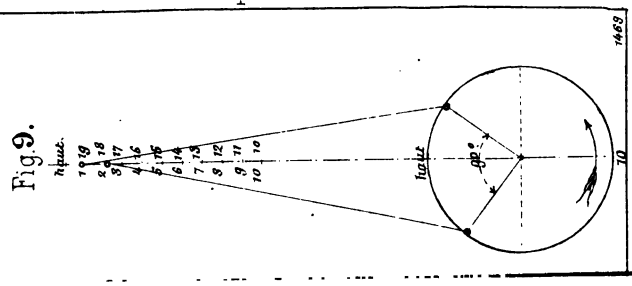
SECONDE PARTIE

Machines à triple expansion, à une seule bielle 33
Machines à trois cylindres et à deux bielles 34
Machines à quatre cylindres et à deux bielles 38
Machines à trois cylindres et à trois bielles 39
Machines à trois manivelles, ayant plus de trois cylindres 41
Machines mixtes. 42
Machines Perkins 46
Machines à quadruple expansion 47
Conclusions 48

ANGERS, IMPRIMERIE A. BURDIN ET Cie, 4, RUE GARNIER.

Digitized by Google

Digitized by Google



Digitized by Google

Digitized by Google

Fig. 7. Courbes d'une machine à triple expansion à bord du "Falkenburg".

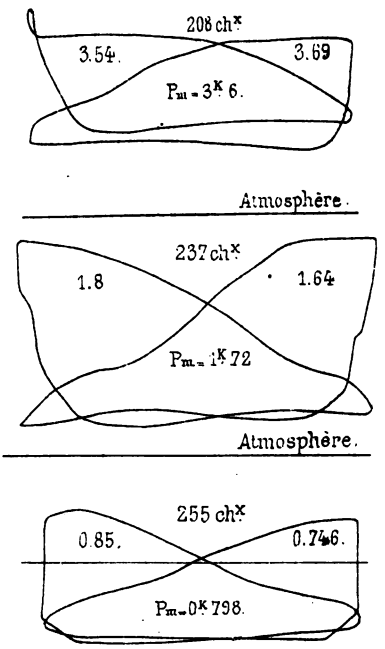
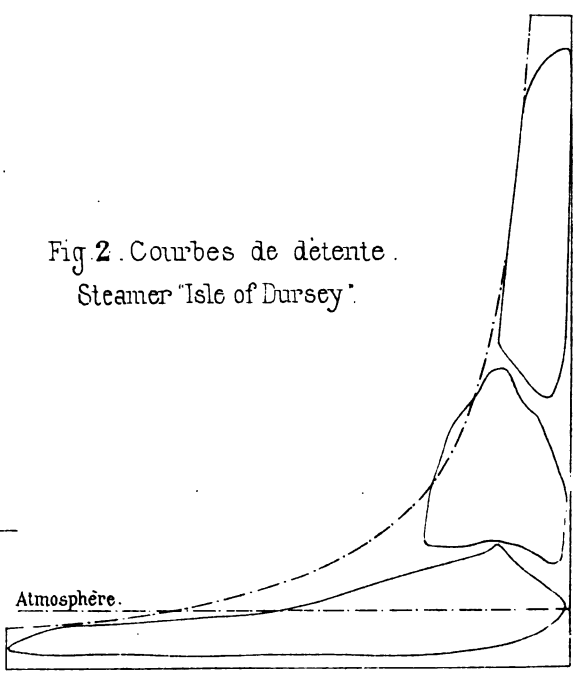


Fig. 2. Courbes de détente.
Steamer "Isle of Dursey".



Auto. Imp. A. Broise & Courtier, 48, r. de Dunkerque.

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

89089672109

B89089672109A

Digitized by Google

Digitized by Google

89089672109
b89089672109a
Digitized by Google